УДК 621.039.542.34

ПОДГОТОВКА ПОРОШКОВ ДИОКСИДА УРАНА К СУХОМУ ПРЕССОВАНИЮ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК. Часть 1

И.И. Локтев, А.Б. Александров, К.Ю. Вергазов, В.В. Гузеев

ОАО Новосибирский завод химконцентратов
Северский государственный технологический институт
E-mail: nzhk@nccp.ru; guzeev@ssti.ru

Обсуждаются различные способы подготовки порошка диоксида урана, которые предназначены для изготовления топливных таблеток методом порошковой металлургии с использованием сухой связки. Предлагается порядок действий при анализе свойств порошка и выборе, в зависимости от этого способа его обработки перед прессованием.

Введение

Многолетний мировой опыт изготовления таблетированного топлива для атомных станций выработал основные технологические приёмы получения порошка диоксида урана, подготовки его к прессованию таблеток, изготовления самих таблеток [1, 2]. Каждый из этих этапов содержит несколько операций, которые также стали типовыми. Они направлены на формирование основных качеств порошка, которые делают его материалом керамического сорта – спекаемость, текучесть и прессуемость. Закладываются эти свойства, в основном, на стадии химического передела [3–6] и продолжают формироваться, при их физической обработке.

Порошки диоксида урана, полученные через осаждение полиуранатов аммония (ADU-технология) [6], обычно стабилизируют от окисления на воздухе в среде с пониженным содержанием кислорода, измельчают в мельнице или дробилке для усреднения частиц порошка [7–10], уплотняют и гранулируют для достижения необходимого для прессования насыпного веса и текучести [10–16].

Однако, производство порошков и керамических таблеток сегодня не становится проще, чем в годы его разработки. Связано это не только с тем, что свойства порошков, а значит и таблеток, очень сильно зависят от конструктивных особенностей используемого оборудования, но и с условиями конкурентной борьбы за рынок на внутреннем и внешнем рынке требующие усовершенствования и удешевления технологии.

Эти соображения заставляют использовать более короткие, менее трудоёмкие, с большим выходом по продукту технологические схемы. К таким схемам относится процесс сухого прессования таблеток, принятый в Новосибирском заводе химконцентратов (ОАО "НЗХК"), использующий порошки ADU разных изготовителей.

Как показала практика изготовления таблеток в ОАО "НЗХК" прямым прессованием таблеток из порошков диоксида урана, полученным после осаждения и прокалки полиуранатов аммония, восстановления до диоксида урана, структура исходных порошков может изменяться от партии к партии и су-

щественно влиять на свойства таблеток. Поскольку производство порошков ADU не стабильно по своей природе, эта нестабильность при сухом прессовании может приводить к нестабильности свойств таблеток [17]. Поэтому некоторые полученные партии диоксида урана всё-таки нуждаются в специальной подготовке перед прессованием таблеток.

В данной статье обсуждается, какую обработку порошка применять и в каких случаях.

1. Получение порошка диоксида урана

1.1. Характеристики порошка UO_2

Стандартный процесс производства порошка UO_2 керамического сорта включает следующие основные стадии:

Желтый кек
↓
Растворение в азотной кислоте
↓
Очистка путем жидкостной экстракции
↓
Уранилнитрат ядерного сорта
↓
Осаждение ADU гидроксидом аммония
↓
Разделение твердой и жидкой фаз
↓
Прокаливание и восстановление высушенного ADU
↓
Кондиционирование
↓
Порошок UO_2 керамического сорта

Свойства порошка, определяющие качество топливных таблеток, определяются на последних стадиях процесса, т.е. стадиях осаждения, прокаливания/восстановления и кондиционирования (или пассивирования). Характеристики порошка UO_2 могут быть подразделены на химические и физические. Химическая чистота UO_2 необходима прежде всего из-за требования минимизирования поглощения нейтронов. Канадские авторы [1] обнаружили, что некоторые примеси в UO_2, такие как сера в количестве 20 ppm, способствует усиленному росту зерна в таблетках UO_2, а также возникновению других дефектов: дендритной ликвации (*coring*), отслаивания (*spalling*) и растрескивания. Другими примесями, которые могут влиять на микроструктуру таблеток, являются Ca, Mg и Si.

Физические свойства порошков UO_2, важные с технологической точки зрения, включают удельную поверхность, распределение частиц по размерам, степень агломерации и прочность агломератов [2–6]. Другие характеристики порошка, такие как стехиометрия, насыпная плотность и плотность с утряской, и сырая плотность, также тесно связаны с вышеперечисленными физическими свойствами.

В таблице перечислены характеристики порошка UO_2, важные для производства таблеток, определенные на основании опыта изготовления большого количества партий порошка.

Таблица. *Характеристики порошка UO_2*

Физическое свойство		Технологический эффект
Удельная поверхность	Низкая	Стабильность к окислению Низкая спеченная плотность Большие спеченные поры
	Высокая	Легкое спекание до высокой плотности Растрескивание во время спекания Нестабильность к окислению
Размер частиц	Малый	Трудность прессования Большие градиенты в сырых таблетках Легкое спекание до высокой плотности
	Высокий	Низкая спеченная плотность Более гомогенные сырые таблетки
Прочность агломератов	Низкая	Легкость прессования Спекание до высокой плотности Гомогенная микроструктура таблеток
	Высокая	Трудность прессования Некачественные спеченные таблетки
Отношение O/U	Низкое	Низкая спеченная плотность Нестабильность порошка
	Высокое	Легкое спекание до высокой плотности Негомогенная микроструктура

1.2. Получение порошка диоксида урана

На стадии получения порошков закладываются их основные свойства, которые определяют поведение диоксида урана при изготовлении таблеток и свойства этих таблеток [18, 19]. Основной точкой приложения сил разработчиков технологии является, как правило, решение двух задач, – определение оптимальных режимов получения промежуточных продуктов (полиуранат, триураноктооксид) и конечного диоксида урана, а также, – стабилизация свойств этих продуктов. Задачи решались и решаются различными методами – теоретическими исследованиями, постановкой факторных экспериментов, мониторингом процесса изготовления продукции и статистическим анализом полученных данных. В последнее время начинают применять также методы стохастического анализа с привлечением моделей, описывающих изучаемые процессы [20].

В любом случае выполняют стандартный контроль качества обрабатываемого материала и дополнительные исследования их свойств. Основными параметрами являются полная удельная поверхность и насыпная плотность, исследуют также фазовый состав, кислородный коэффициент, делают гравиметрический анализ для оценки степени разложения, оценивают степень агломерированности [21–23].

Плотность полиуранатов увеличивается при снижении концентрации растворов из которых их осаждают, а также при увеличении pH и длительности осаждения. Удельная поверхность осаждённых порошков увеличивается с повышением pH, температуры раствора и снижается при увеличении длительности осаждения. Повышение температуры прокалки соли в диапазоне 100...800 °C увеличивает плотность порошка триураноктооксида и снижает площадь её поверхности. Прокалка выше 800 °C даёт плохую спекаемость диоксида урана, энергия активации увеличивается вдвое [24]. Это связано также с размером частиц порошка, кото-

рый зависит от двух противоположных эффектов – спекания полиураната и термического разложения соли при прокалке, размер частиц влияет на плотность таблеток [19].

Форма частиц порошка сохраняется после разложения соли при температурах до 550 °С. Адгезионные свойства порошка обратно пропорциональны размеру частиц [18].

Разложение соли в статическом виде приводит к неоднородности состава порошка, к наличию фаз β-UO_3 и $UO_{2,9}$ в получаемой триураноктооксиде, что отражается и на микроструктуре спечённых таблеток (мелкие зёрна, 2...3 мкм, с островками крупных зёрен, 10...20 мкм; два вида пор – крупные неправильной формы межзёренные поры, 2...50 мкм, и мелкие, менее 1 мкм, внутризёренные поры) [18].

Достижение необходимого качества промежуточного оксида определяется рентгеновским анализом по фазовому составу. Двухэтапное 2 ч восстановление триураноктооксида при температуре 400 и 700 °С устраняет последствия предварительной истории получения порошка и даёт постоянство кислородного коэффициента [22].

Значение имеют не только тонкости технологического процесса получения диоксида урана, но и конструктивное его воплощение. Попытки сокращения реакционных зон или ускорения выполнения операций могут свести на нет технологические ухищрения. Чем ближе производительность установки к её предельным возможностям, тем точнее необходимо задавать значения переменных процесса, определяющих однородность свойств порошка от партии к партии, поскольку это сильно влияет на экономику производства [25]. Поэтому исследование свойств полученного диоксида урана позволяет сделать заключение о необходимых качествах продукта. Лучше других способов даёт такую оценку испытание на спекаемость порошка [21].

1.3. Тест на спекаемость

Целью теста на спекаемость является подтверждение способности порошка к достижению требуемой плотности в заданных условиях. Обычно этот тест не имеет своей целью имитировать процесс производства таблеток. Заданные условия теста включают параметры прессования (давление, время выдержки, связующий или смазка), параметры сырых таблеток (минимальная плотность, минимальный диаметр, отношение длины к диаметру) и условия спекания (атмосфера, температурный режим). Критерии приемки основаны на значениях спеченной плотности. Хотя тест на спекаемость не имитирует процесс производства, при определении условий его проведения необходимо учитывать некоторые параметры процесса. Плотность сырой таблетки очень неоднородна, и зависит от параметров прессования (приложенного давления, времени выдержки, смазки стенок пресс-формы), а также от геометрии таблетки (диаметра, отношения длины к диаметру). Если определены не все параметры, распределение плотности в сырой таблетке не будет воспроизводимым. Например, при использовании одних и тех же параметров, но одностороннего или двухстороннего прессования, будет получено совершенно различное распределение плотности в сырой таблетке.

Другой параметр, важный для процесса изготовления – это диаметр сырой таблетки. Сырые таблетки, отпрессованные в одинаковых условиях, но с различным диаметром, достигают различной плотности после спекания. По этой причине необходимо указывать диаметр пресс-формы, используемой для теста на спекаемость, чтобы получать результаты, полезные для изготовителя таблеток.

2. Виды дефектов спечённых таблеток, связанные со свойствами исходного порошка и методы их устранения

2.1. Окисление порошка на воздухе

При изготовлении порошка диоксида урана он может иногда спонтанно окисляться с образованием оксидов с высоким кислородным коэффициентом. Этот процесс приводит к высвобождению нежелательного тепла и снижает керамическую активность порошка, делает его непригодным для изготовления таблеток без дополнительной обработки. Вероятность спонтанного, или, как ещё называют в литературе, импульсного [26], окисления порошка зависит от его активности, являющейся, прежде всего, функцией удельной поверхности и кислородного коэффициента. Порошок с малым размером частиц (с большой удельной поверхностью), или с низким кислородным коэффициентом более склонен к спонтанному окислению, чем более крупный порошок или порошок с повышенным отношением кислорода к урану [26, 27].

Самопроизвольный разогрев и окисление порошка диоксида урана с полной удельной поверхностью более 3,5 м^2/г, находящегося в большой массе, например в контейнере на воздухе, рассмотрен в [17]. Происходит окисление при постепенном разогреве слоя порошка за счёт теплового эффекта начальной стадии окисления. В местах с максимальной температурой локальный разогрев достигает до значений, при которых образуются высшие оксиды урана. Из-за поглощения кислорода и выгорания части диоксида, реакция гаснет. Порошок приобретает тёмный цвет. Доля окисленного порошка в контейнере невелика, кислородный коэффициент диоксида, усреднённой по нескольким тарным местам, может увеличиться незначительно, например, с 2,04 до 2,07. Рентгеноструктурный анализ показывает наличие фазы U_3O_7 или U_3O_8, если окислено не менее 5 % порошка. При окислении около 1 % порошка каждая таблетка будет иметь раковину на поверхности. Неоднородный фазовый состав диоксида вызывает неоднородную усадку таблеток при спекании, является причиной образования раковин, кольцевых пор, даёт неравномерное зерно по объёму спечённых таблеток [17].

Контроль стабильности полученных партий продукта считают обязательным из-за склонности порошков ADU к самопроизвольному окислению [28]. Определить такую склонность диоксида урана можно по увеличению массы навески при выдержке её на воздухе в течение 30 мин при температуре 50...70 °C. Если происходит нелинейный прирост массы от роста температуры, следует опасаться его окисления при хранении, при прессовании таблеток [29, 30].

Если не удаётся получить стабильный порошок при его получении, его окисление предотвращают выдержкой полученной диоксида урана в среде с пониженным содержанием кислорода или в атмосфере углекислого газа [6] обычно сразу после восстановления диоксида.

Окисленный порошок можно сделать кондиционным, путём отжига в восстановительной атмосфере при температуре 500...600 °C [29]. Другой способ переработки – помол до размера частиц максимум 100...300 мкм [29]. Если он после этого потеряет текучесть, необходимо будет использовать его уплотнение и грануляцию, или подмешивать его к другой партии порошка.

2.2. Образование контурных несплошностей

Наличие оксидов высшего порядка в диоксиде урана и в прессованных таблетках будет приводить к неоднородному спеканию таблетки из-за восстановления оксидов урана до диоксида и усадки в этом месте ещё до начала спекания всей таблетки. В результате происходит или повышенная усадки материала в этом месте, или образование разрывов в сплошном теле таблетки, в зависимости от масштаба фазовой неоднородности. Это явление рассмотрено в [17], где показано, что расслоение шириной более 2...5 мкм уже не зарастёт при спекании. Наличие в порошке крупных окисленных частиц в сотни микрон, которые не разрушаются при перемешивании порошка и его прессовании, приводит к двум эффектам. Создаётся разрыв сплошности, расслоение таблетки шириной более 5 мкм в месте контакта частицы с остальной частью таблетки, а форма расслоения повторяет контур частицы. В результате, после спекания образуются характерные контурные несплошности, которые в сечении шлифа и на поверхности таблеток выглядят как замкнутые кольцевые зазоры, кольцевые поры, как их называют, или раковины.

Никаких других последствий, кроме локального нарушения сплошности и некоторого развития открытой поверхности таблеток, контурная несплошность не вносит. Некоторые изготовители топлива допускают определённое количество таких дефектов [31]. Как ограничение по количеству и размерам раковин на таблетке, требование их полной недопустимости касается только размера более 2,5 мм. Допускается не более 2 раковин на таблетке с размерами более 1,0 мм, или не более 15 раковин более 0,5 мм. Раковины менее 0,5 мм не ограничиваются [29].

Появление или образование частиц, способствующих появлению контурных расслоений в таблетках, возможно, как уже упоминалось, при самопроизвольном окислении порошка диоксида урана. Экспериментально показано также, что подобный эффект вызывает гарнисаж, продукт, образующийся во влажной атмосфере печи и временно осевший на стенках оборудования.

Исключить образование контурных несплошностей можно более тонкой регулировкой режимов прокалки полиураната аммония.

Если порошок уже получен, то его необходимо, как было описано в п. 1.1, восстановить (исключить фазовую неоднородность), или измельчить (устранить масштабный фактор).

2.3. Повышенная открытая пористость

Порошок диоксида урана имеет определённую собственную структуру, которая формируется всем процессом его получения. При осаждении полиураната из раствора образуется первичная мелкодисперсная твёрдая фаза субмикронного размера. При прокалке соли первичные частицы образуют между собой связи за счёт процессов, сходных со спеканием. При высоких температурах (близких к 800 °C), они даже сплавляются. В трубчатой вращающейся печи масса из сцепляющихся частиц непрерывно разрушается. Неразрушившиеся образования представляют собой вторичные частицы порошка – агломераты, или более плотные – агрегаты. В зависимости от режимов получения порошка размер вторичных частиц достигает сотен мкм (500...800 мкм).

На рисунке показан внешний вид частиц порошка диоксида урана (ADU-технология) двух различных партий, которые имеют различные характеристики. Однако, при изготовлении керамических таблеток используют твёрдую или жидкую связку даже при прессовании хорошо прессуемых порошков.

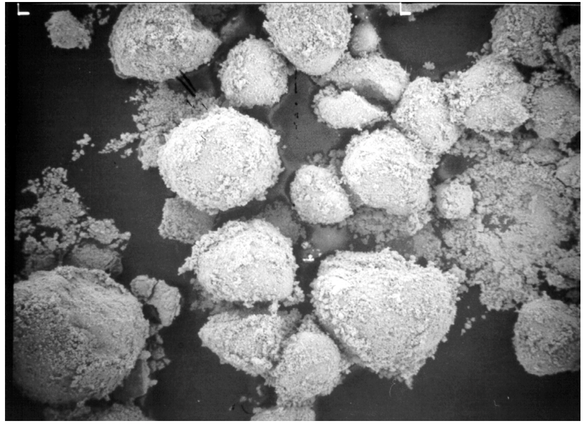


Рисунок. *Внешний вид частиц порошка диоксида урана ADU от двух партий. ×50*

Структурной единицей спечённых таблеток является зерно с гораздо меньшим размером – 5...25 мкм. Их формирование и рост при спекании происходит за счёт перекристаллизации первичных частиц диоксида урана. Но, если агломераты

порошка прочные и при прессовании таблеток сохраняют в какой-то степени свои индивидуальные черты (плотность, форму, размеры), то прессовка, а потом и спечённая таблетка, будут отражать в своей структуре гранулированную структуру порошка. Проявляться это может вторичными стркутурными признаками – группами более крупных, или более мелких зёрен, скоплением пор, крупными треугольными порами между гранулами. В худшем случае это может вызвать связанную межчастичную открытую пористость и низкую плотность.

Закономерности спекания таблеток из диоксида урана таковы, что при плотности более 95 % (более 10,45 г/см^3), практически исчезает открытая пористость, то есть, она снижается до 0,1...0,5 % [19].

Неоднородность свойств порошка ADU состоит также в том, что прочность его частиц различная, например, прочность на раздавливание частиц размером более 500 мкм изменяется от 50 г до 1 кг. При прессовании таблеток некоторые частицы деформируется, некоторые – почти нет. Если частицы порошка мягкие, то таблетка плохо пропрессовывается, имеет неоднородную плотность, но хорошо спекается. Если все частицы жёсткие, то прессование происходит при высоких давлениях, микроструктура таблеток получается неоднородной, пористой [32–36].

На практике используют порошки с примерно равным соотношением мягких и прочных частиц.

Жёсткие порошки, которые имеют повышенное содержание прочных частиц, до 80 %, ещё позволяют изготавливать таблетки промышленным способом, но стойкость прессинструмента снижается на порядок. Повышается риск получения некачественных таблеток.

В частности, при дефиците мелкой фракции, например, при содержании частиц менее 71 мкм до 6 %, межчастичное пространство плохо заполняется деформируемой частью порошка. Возникает сеть связанной пористости, которая даже при плотности таблеток более 10,45 г/см^3 достигает 1...3 %.

Исключить образование повышенной открытой пористости можно снижением жёсткости получаемых порошков. Если они уже были получены, то по литературным данным, можно предложить три способа коррекции свойств диоксида урана. Несколько циклов окисления-восстановления для разрушения прочных гранул [37], измельчение порошка в мельнице [7–10]. Третий способ – измельчение части порошка в мельнице и подмешивание его назад в исходный порошок в количестве до 20 % [38]. Более высокие содержания мелкой фракции могут сделать порошок не текучим.

Нельзя исключить и метод компенсации – разбавление жёсткого порошка мягким, до получения средних значений содержания прочных частиц.

3. Выводы и рекомендации

1. Установлено, что факторы, такие как пористость, дисперсность, удельная поверхность порошка диоксида урана влияют на качество спечённых таблеток.
2. Определен набор свойств исходных порошков, методы диагностики и способы устранения недостатков, влияющих на характеристики порошка.
3. Определены и использованы практически в производстве технологические факторы, влияющие на качество таблеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radford K.C., Pope J.M. Controlled porosity reactor fuel // Journal of Nuclear Materials. – 1977. – V. 64. – P. 289–299.
2. Ohai D. Contribution to fuel manufacture technologies for advanced reactors, Ph.D. Thesis, Bucharest-Romania, 1997.
3. Janov J., Alfredson P.G., Vilkaitis V.K. The influence of precipitation conditions on the properties of ammonium diuranate and uranium dioxide powders. AAEC/E-220, May 1971. – 40 p.
4. Hoyt R.C. Canoga Park Control of particle size distribution and agglomeration in continuous ammonium. Transactions-of-the-American-Nuclear-Society-USA. – CONF-7811109, 1978. – V. 30. – P. 182.
5. Bishay A.F. Thermal decomposition of ammonium uranates. International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria). Advanced fuel technology and performance: Proc. of an advisory group meeting held in Wuerenlingen, Switzerland 4–6 Dec. 1984. IAEA-TECDOC-352. Oct. 1985. – 244 p. – P. 235–240.
6. Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. – Томск: STT, 2002. – 326 с.
7. Young-Woo Lee, Sang-Ho Na, Si-Hyung Kim, Myung-Seung Yang, Dong-Seong Sohn. Effect of milling on the characteristics and sinterability of UO_2 powders from different conversion processes/ Proc. of the workshop on manufacturing technology and process for reactor fuels. Atomic Energy Research Inst., Tokyo (Japan). Feb. 1996. – 214 p.
8. Patent 7-167486 JP. Manufacturing method of Gd sub 2 O sub 3 added UO sub 2 pellet. Akira Komono; Patent 9-15365(A) JP; 17 Jan. 1997; 3 Jul. 1995.
9. Patent 2156144 (A) GB. Fabrication of nuclear fuel pellets / M.R. Hayes. GB priority 8406208. 2 Oct. 1985; 9 Mar. 1984. – 3 p.
10. Naylor A., Ellis J.F., Watson R.H. Chemical Aspects of Nuclear Fuel Fabrication Processes // J. Chem. Tech. Biotechnol. – 1986. – V. 36. – P. 162–168.
11. Sheikh P.A., Shafique M. Effect of precompaction on the compressibility of uranium dioxide powder // Powder-Metallurgy-UK. – 1977. – V. 20. – № 4. – P. 232–234.
12. Goldmann L.H. Jr., Holley C.C. Roll compaction and granulation system for nuclear fuel material. HEDL-SA-2498-FP; CONF-810897-1, 29 Jul. 1981. – 12 p.
13. Kang Y.H., Lee K.A., Chung S.T., Kim B.G., La S.H., Shin W.C., Park D.K. a.o. Manufacturing process of UO sub 2 pellets. KAERI/RR-236/80, 1981. – 78 p.
14. Rajagopalan P.P., Ramachandran R., Mehrotra R.S. Effect of precompaction on sintered UO sub 2 pellets. Department of Atomic Energy, Bombay (India). Materials Science Committee / Proc. of the symposium on sintering and sintered products at (Bombay, Oct. 29–31, 1979). Bombay. Department of Atomic Energy, 1980.

15. Patent 60-239755 JP. Method of manufacturing nuclear fuel pellets / Iwaki, Toshiyuki; Watarumi Kazutoshi. 7 May 1987; 25 Octю 1985. — 3 p.
16. Patent 1592468 (B) DE. Method to manufacture a uranium dioxide granulate / K. Hackstein, N. Müller. 20 May 1976. — 2 p.
17. Патент 2456731 РФ. Способ получения топливных таблеток / Г.Г. Потоскаев, В.С. Курсков, Н.А. Балагуров и др. Опубл. 1999. — Бюл. № 14.
18. Mintz M.H., Vaknin S., Kremener A., Hadari Z. Nuclear fuel research and development — influence of various manufacturing parameters on some characteristics of UO sub 2 powders and their sintering behavior. Joint annual meeting of the Israel Nuclear Societies Technion. — Israel Institute of Technology Department of Nuclear Engineering. — Haifa, Israel. 4—5 Dec. 1977.
19. Bloch J. Powder particle size distributions as means of design and control in the fabrication of ceramic nuclear fuel. NRCN-484 Report Israel Atomic Energy Commission, Beersheba, 1979.
20. Von Collani E., Baur K., Reimann P. Advanced Nuclear Fuels GmbH Manufacturing of fuel assembles process management quality control, continuous quality improvement. TOPFUEL, 2003.
21. Glodeanu F., Spinzi M., Balan V. Correlation between UO sub 2 powder and pellet quality in PHWR fuel Manufacturing. 3 Conf. on characterization and quality control of nuclear fuels. Karlsruhe (Germany, F.R.). 25—27 May 1987. 3. Konferenz über Charakterisierung und Qualitaetskontrolle von Kernbrennstoffen.
22. El-Fekey S.A., Bishay A.F., Farah M.Y., Hammad F.H. Some characterisation profiles of uranium oxides pertaining to ceramic fuel preparation. Atomic Energy Establishment, Inshas (Egypt). 1978.
23. Xu L., Zhang H., Xie H. Thermal analysis of UO_2 powder. Nuclear Power Institute of China, Sichuan. Report CNIC-00486; SINRE-0027. Feb. 1992. — 10 p.
24. Das P., Chowdhury R. Measurement of activation energy values for sintering of active urania powder compacts.: Materials-Science-and-Technology. — 1989. — V. 5. — № 3. — P. 299—300.
25. Kondal-Rao N., Shri S., Katiyar H.C., Sinha K.K., Gupta U.C., Rajendran R., Patro J.B. Technological aspects of UO sub 2 fuels — characterisation and quality control Indian experience. Conference on characterization and quality control of nuclear fuels. Karlsruhe, Germany, F.R. 13—15 Jun. 1978.
26. Patent 4751098 USA Reoxidation of partially oxidizable powders / B.H. Parks, N.W. Hille. June 14, 1988. Westinghouse Electric Corp.
27. Patent 5066429 USA. Method for passivating uranium oxides to control oxidation, and the oxidation resisting uranium product there of / R.I. Larson, R.P. Ringle, J.L. Harmon. — Nov. 19, 1991. General Electric Company.
28. Araujo R.M.S., Almeida S.G., Bezerra J.H.B., Silva S.P. Methodology for analysing powder and UO_2 pellets samples of nuclear purity, using gravimetry and potentiometric tritation of Davies and Gray/NBL. Associacao Brasileira de Energia Nuclear, Rio de Janeiro: Proc. of the 1st General Congress of Nuclear Energy. — 1986. — V. 1. — 430 p., V. 1. — P. 301—303.
29. Production of free-flowing and sinterable UO_2 powder BARC // News Lett. — 1994. — № 130. — P. 7.
30. Belle J. Properties of Uranium Dioxide // II meeting on Peaceful using of nuclear energy. — Jeneva, Sept. 1—13, 1958.
31. Техническая спецификация: Таблетки смешанного оксидного топлива для демонстрационных испытаний облучением в легководном реакторе. Разработана Ок-Риджской национальной лабораторией по заказу Департамента энергетики США, 1997.
32. Balakrishna P. et al. Uranium dioxide powder preparation, pressing and sintering for optimum yield // Nuclear Technology. — 1999. — V. 27. — № 9. — P. 375—380.
33. Glodeanu F., Spinzi M., Balan V. Correlation between UO_2 powder and pellet quality in PHWR fuel manufacturing // Journal of Nuclear Materials. — 1988. — V. 153. — P. 156—159.
34. Ishimoto S., Kubo T., Ito K., Ishikawa T., Hayashi H. Characterization of ceramic powder compacts // Journal of Nuclear Materials. — 1995. — V. 224. — P. 79—84.
35. Hodgson G. Uranium dioxide production // British Nuclear Fuelds Pic. — № 8915778, 1989.
36. Balakrishna P., Singh Ajit, Gupta U.C., Sinha K.K. Agglomerate-free fine UO_2 powders. TopFuel'97. BNES, 1997. — P. 5.284—5.291.
37. Bae K.K., Kim H.S., Lee J.W., Lee Y.W., Yang M.S., Juhn P.E. Characterization and comparison of the sintering behaviors of the variously-treated UO_2 powders: 3th Intern. Conf. on CANDU fuel. — Chalk River, ON (Canada). 4—8 Oct. 1992.
38. Danroc J. The pressure bonding ability of uranium dioxide powders in relation to the evolution of their surface properties. CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, 38 (France). Institut National Polytechnique, 38. — Grenoble (France). Thesis-or-Dissertation, CEA-R-5185 1982.

УДК 66.022:621.979